

苏联学者谈成岩韵律的形成问题

韵律往往是含碳酸盐结核层所特有的结构。碳酸盐结核是典型的成岩作用产物,可以为查明结核周围岩石形成时的条件提供必要的信息。

在自然界中,经常可以见到沉积地层或某些岩段的韵律结构。根据剖面中出现的韵律往往可以作出有关沉积作用旋回性的某些结论。

Ботвинкина(1959)及 Дафф(1971)等人认为有时韵律可能是在沉积物的成岩作用阶段中形成的。Н. Я. Денисов(1948)和 Г. А. Смирнов 等人(1974, 1977)在实验室的实验过程中,模拟出沉积物经成岩作用被分为不同成分的层的过程。

然而,由于没有弄清成岩作用过程中韵律的形成机制,而且目前也没有建立起能可靠地用于区分成岩夹层与原生沉积夹层的准则,所以关于成岩作用形成韵律的观点在地质人员中还没有得到广泛的承认。

Ю. О. Гаврилов(1979)以产高加索东部中新世中期的沉积为例,探讨了在成岩作用期间粘土沉积物(沉积物中含原始均匀分布的碳酸盐物质)中形成碳酸盐夹层的可能性问题。

在前高加索东部中新世中期的恰克腊克-卡腊冈地层中,含有不同矿物成分的结核,但其中数量最多的是呈现出各种不同分带结构的方解石和方解石-菱铁矿结核。

这种类型的结核产于黑色粘土层中。这种粘土层几乎不含粉砂质杂质,但富含有机质($C_{\text{有机}}$ 由 3%到 10%)。黑色粘土层厚 2—4 m,但在恰克腊克地层的底部,黑色粘土层的厚度可达数十米(图 1)。

几乎看不到单独方解石结核和方解石-菱铁矿结核层,通常在含结核的岩段内有 5 至 8 个夹层(图 2)。含结核岩段的韵律结构十分醒目,岩层互层大致是等间隔的(由 0.1—0.2 至 1 m)。而且在结核的大小与岩层距离之间往往有明显的正比关系。如果说在最常见的含结核岩段内,当椭圆形结核的直径为 0.5—0.25 m 时(见图 1),夹层之间的距离为 0.1—0.3 m 的话,那么在夹层之间的距离扩大到 1 m 的某些层位中,结核的直径则增大到 1.0—1.5 m(图 3)。

Гаврилов(1977)认为,有很多证据可以表明方解石结核也和带状结核的核部一样,是在充水松散淤泥最上部层的 20—30 cm 部位形成的,而菱铁矿形成较晚,是在比较致密的沉积物中形成的。黑色粘土岩段韵律结构的成因问题的解决,与查明每个层的成因有不可分割的紧密联系。

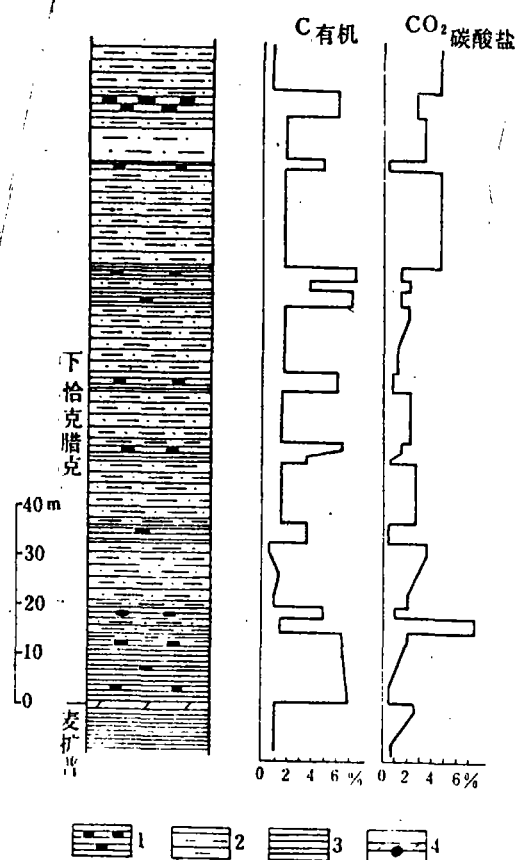


图1 艾利斯坦日河沿岸恰克腊克地层下部的岩性-地球化学柱状剖面图

- 1—黑色粘土,含方解石结核及带状方解石-菱铁矿结核;
2—褐色粉砂质粘土;
3—灰色粘土(麦扩普);
4—泥灰岩层(塔尔汉层)

Fig. 1. Lithologic-geochemical columnar section in the lower part of the Чокрак strata along Элстанжи.

1 = black clay containing calcite concretions and banded calcitesiderite concretions; 2 = brown silty clay; 3 = grey clay (Майкоп), 4 = marl bed (Тарахан)

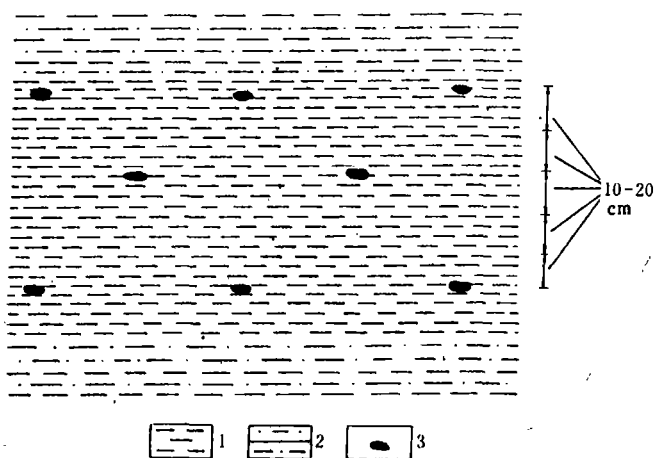


图2 含钙质结核夹层的黑色粘岩段的结构

1—黑色粘土; 2—粉砂质粘土; 3—钙质结核。

Fig. 2. The structure of black claystone member with calcareous concretion interclations.

1 = black clay; 2 = silty clay;
3 = calcareous concretions.

H. M. 斯特拉霍夫(1960)认为,在粘土质地层中,经过成岩作用形成的碳酸盐结核往往呈层产出,其原因之一就是 CO_2 沿沉积物成层面从淤泥中逸出,使碳酸盐物质沿层面富集。观察表明,在粘土中存在砂质—粉砂质薄夹层(它们在沉积物中起着“通风道”的作用)的情况下,上



图3 含巨大方解石结核岩段的结构(铁锤长70cm)

Fig. 3. The structure of the rock member with giant calcite concretions. The hammer is 70cm in length.

述因素影响往往较明显。这时,碳酸盐结核似乎“串连”成为小夹层。这种小夹层是由围岩的较粗基质构成的。

造成结核夹层的另一个原因是碳酸盐堆积作用暂时的相对或绝对加强,接着又在已经形成的夹层中发生碳酸盐物质的重新分配并集结成结核,因此使地层堆积的原始沉积条件发生了变化。

恰克腊克-卡腊罔地层中的方解石结核夹层也可能不是由于沉积物沿着层面发生去气作用而形成的,因为黑色粘土层位沿走向十分稳定。此外,因为在松散而强烈充水的淤泥中形成了方解石结核,所以沉积物的侧向去气作用并不比垂向去气作用明显。黑色粘土中也不含粉砂杂质,这种杂质却能构成细小的、可促使 CO_2 从淤泥中逸出的透镜体和薄层。

Ю. О. Таврилов 认为,某些夹层不大可能因沉积条件的改变而富集碳酸钙。将含结核夹层的粘土与相邻岩层粘土进行详细对比,它们之间没有任何差别。此外,成岩结核的夹层虽然也能追索数公里,但是沿走向并不稳定,完全不能与明显沉积成因的泥灰岩相比拟,作者可延伸数十甚至数百公里。为了用沉积作用的性质来解释具有韵律结构的含结核的成因,就需要假设沉积环境发生了频繁的变化,可是这些沉积物恰恰是在最稳定的条件下形成的。

根据含结核岩段结构分析的结果,可以得出这样的结论:成岩作用过程,不仅由于在富集碳酸盐的夹层中通过物质的再分配而决定了结核的形成,而且在碳酸盐物质原始分布很均匀的沉积物中明显地促进了这些夹层本身的形成。

沉积物中碳酸钙的状况以及碳酸盐结核形成的过程,均受淤泥水中碳酸状态的调节。因此,了解成岩作用活跃带中碳酸的动态是很重要的。

О. В. Шишкина (1972) 研究现代沉积物的结果表明,在绝大多数情况下,在发生碳酸盐还原的淤泥水中,碳酸盐减少的同时, HCO_3^- 的含量增大。

Н. М. 斯特拉霍夫 (1972、1976) 分析了还原作用的动力学问题后指出,虽然 HCO_3^- 在淤泥上部层位中的形成作用特别强烈,但它在这里的含量却最低,因为大量离子分散于底层水中,而且,在沉积物的最深层位中 HCO_3^- 很难排出,所以其浓度不断增大。同时,由于分散在淤泥中的 CaCO_3 的溶解,碱的储备量也不断增大。

Н. М. 斯特拉霍夫 (1976) 还指出,在碳酸钙再结晶时, HCO_3^- 离子首先将 CaCO_3 的易溶相(通常为文石相)转移到溶液中,然后在成岩作用导致 CaCO_3 沉淀时, HCO_3^- 离子又从淤泥中跑了出来。

淤泥水中 HCO_3^- 的含量随着沉积物的深度加大而增加, HCO_3^- 对碳酸钙的再沉积产生积极的影响,二者在成岩作用形成碳酸盐层的过程中大概起着决定性的作用。

Ю. Огаврилов 将成岩作用形成层的机制效应概略表示于图 4 中。从图中可以看出成岩作用极为缓慢的粘土—粉砂质沉积岩层开始被富含有机质的粘土质淤泥所复盖。在这种淤泥堆积的开始阶段(见图 4, I),淤泥组成的层还很薄(数厘米),由于还原作用而产生的大部分 HCO_3^- 离子分散于底层水中,并未使分散在沉积物中的 CaCO_3 发生明显的溶解。

此后(见图 4, II),随着沉积物的堆积,从沉降最深的部分排出 HCO_3^- 越来越困难,造成 HCO_3^- 在该部分聚积起来,于是在淤泥层的近表面部分与较深部分的淤泥水中 HCO_3^- 的浓度出现了差别。当 HCO_3^- 达到一定的含量后,分散在沉积物中的碳酸钙便开始溶解。这时已经形成的重碳酸钙由较深层位向淤泥的近表面部分扩散,在淤泥水中碳酸含量偏低的条件下,出现以下反应:

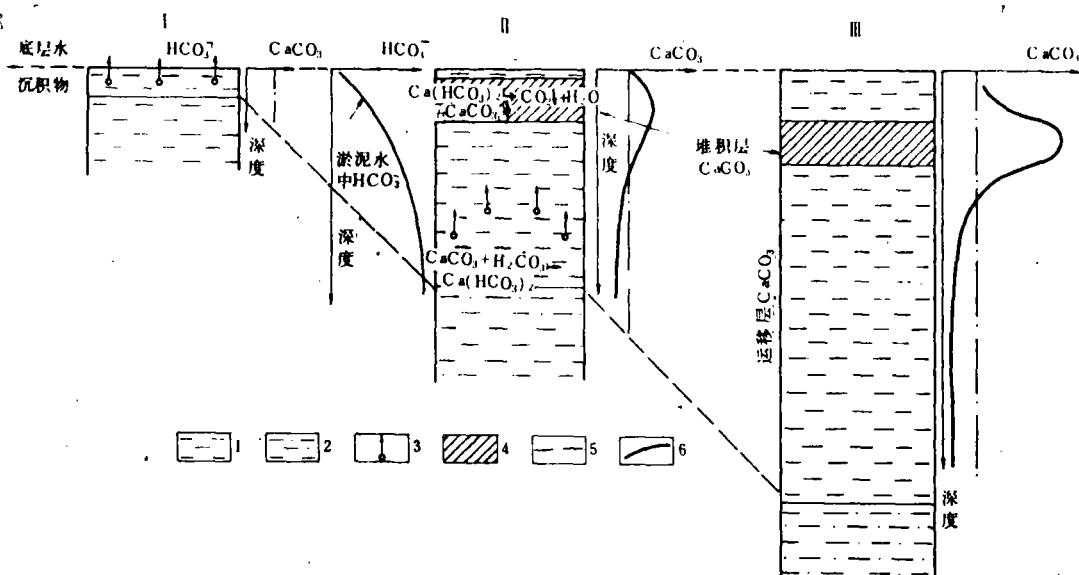
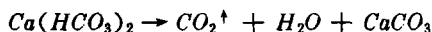


图 4 粘土沉积物中成岩作用形成碳酸盐层的示意图

- 1—富含有机质的粘土沉积物； 2—粘土质—粉砂质沉积物；
 3—重碳酸钙和 HCO_3^- 离子扩散的方向； 4—成岩作用形成的碳酸钙堆积层；
 5—沉积物中 CaCO_3 的原始含量； 6—沉积物在成岩作用过程中 CaCO_3 含量的推测性变化

Fig. 4. Schematic diagram for carbonat beds in clay sediments formed during diagenesis.

- 1=organic matter-rich clay sediments; 2=clay-silty sediments;
 3=the diffusion direction of calcium bicarbonate and HCO_3^- anions;
 4=calcium carbonate accumulations resulted from diagenesis;
 5=original contents of CaCO_3 from the sediments;
 6=the inferred CaCO_3 contents from the sediments during diagenesis.



于是方解石沉淀。由于这种作用，淤泥的下伏地段可能失去 CaCO_3 ，而近表面部分却相反， CaCO_3 富集。这样，就会形成比沉积物中 CaCO_3 原始含量高的层（堆积层）。

然而，在最初的阶段中，“堆积层”富集碳酸盐物质的程度很微弱，而且随着沉积物的堆积和这一层向下沉降，它们可能再被溶解，并重新向淤泥的近表面部分迁移，在那里沉淀方解石。因此，“堆积物”被挤了上去。当该层中 CaCO_3 大量堆积，而淤泥中已有的碳酸不足以使这一夹层溶解时，它便在原来的位置上固定下来，不再进一步往上挤（图 4，Ⅲ）。

看来，“堆积层”就是碳酸盐物质的富集带，由该带向上和向下，碳酸盐的含量平稳下降。与沉积物中 CaCO_3 原始含量相比，沉积物含碳酸盐程度的可能变化示于图 4、Ⅱ、Ⅲ上。如果碳酸盐层的形成到此结束，那么在露头中就能看到由泥灰岩层向粘土的渐变过程。然而，在成岩作用的较晚期阶段中，物质的再分配过程还继续进行。 CaCO_3 由周围粘土（即由 CaCO_3 不太富集的带）向夹层聚集，于是促使沉积物分为两个相，并且在它们之间出现比较明显的边界。

从沉积物中（即从“可迁移层”中）迁出 CaCO_3 的不同，“堆积层”富集碳酸盐物质的程度也可能极不相同。与背景含量相比， CaCO_3 的浓度可以从增加不大到增加甚大（百分之几十，有时甚至 50% 以上）。因此，在地层剖面中，这些夹层有时与岩石的其它部分很难区分，但有时它们却很突出，以泥灰岩层的形式出现。

在成岩作用过程中,“堆积层”本身可能产生不均一的条件,从而引起物质再分配和集结为结核。结核与细小文石介壳和沉积物中的细分散 CaCO_3 相比,抗碳酸溶解作用的能力要强得多,因此在淤泥的较深层位中保持稳定。

如果所堆积的地层相当厚,至少比“可迁移层”厚几倍,那么成岩作用形成层的过程也可能会延续到第一个碳酸盐夹层产生之后。在覆盖新形成岩层的沉积物中,碳酸钙以类似的方式进行再分配,结果造成了一些即第二个、第三个……夹层。沉积物的这种成岩改造作用将一直延续到这类沉积物发生堆积作用为止。多次形成碳酸盐夹层的结果是,在地层中产生了韵律。图5示出了具有韵律结构含结核岩段的形成情况。

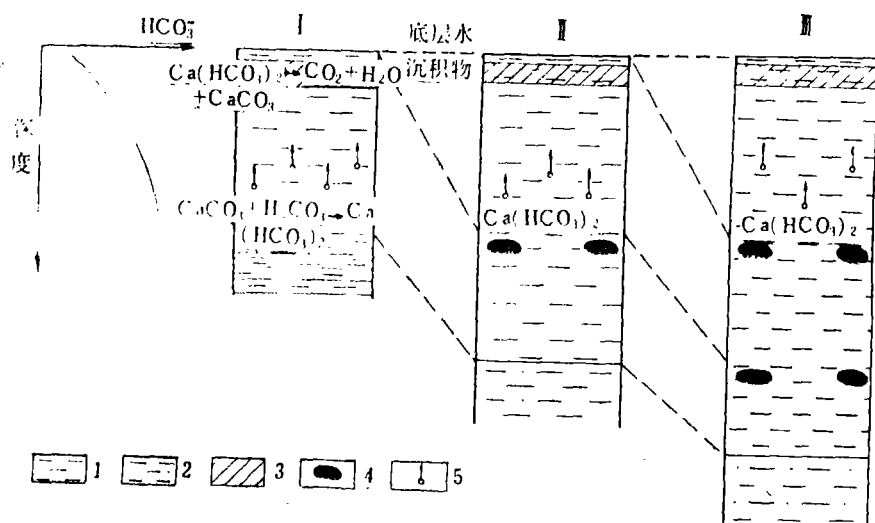


图5 具韵律结构的含结核岩段形成示意图

- 1—富含有机质的粘土沉积物; 2—粘土质粉砂质沉积物; 3—成岩作用形成的碳酸钙堆积层;
4—已形成的碳酸盐结核; 5—重碳酸钙的扩散方向。

• Fig. 5. Schematic diagram illustrating the formation of the concretion-containing rock members with rhythmic structures.

1=organic matter-rich clay sediments; 2=clayey-silty sediments;

3=calcium carbonate accumulations resulted from diagenesis;

4=carbonate concretions which have been formed; 5=the diffusion direction of calcium bicarbonate.

由此可见,成岩作用导致物质再分配过程的结果是,在原始均一的沉积物中造成极大的岩性不均一。

在恰克腊克-卡腊罔黑色粘土中,有丰富的黄铁矿细小结核,证明这里发生的还原作用的强度相当大,存在过有利于成岩作用形成层环境。

然而,在恰克腊克-卡腊罔沉积岩层中,韵律结构仅仅是一定类型的粘土岩段的特征,这说明,必需保持一定的条件成岩作用才能形成韵律结构。对这一过程产生影响的因素如下:沉积物中可起反应的有机质含量、沉积速度、沉积物含碳酸盐的程度、沉积物的粒度成分及其均一性程度以及其它一些因素。

引人注意的是,恰克腊克-卡腊罔地层中的韵律结构是黑色粘土层位所固有的特征,该层位的有机质含量偏高—— C_{org} 占3%—10%。大量有机质的存在决定了沉积物成岩改造作用很

强烈,在淤泥中造成了有利于成岩作用形成夹层的碳酸环境。因此,沉积物中有机质的富集是成岩作用形成韵律的必要条件。

此外,沉积物的堆积速度越小,淤泥底层水中硫酸盐离子的扩散越容易(Н. М. Страхов, 1959, R. A. Berner 1964)。而还原作用的强度在很大程度上也取决于 SO_4^{2-} 的数量。因此,低速度的沉积作用也是有利于韵律形成的条件。这在恰克腊克-卡腊冈地层中得到了证实。对该区不同类型的岩石所进行的对比分析表明,构成含方解石结核的黑色粘土的沉积速度是最低的。

还应指出另一种情况,当沉积物迅速沉积时,淤泥中重碳酸盐的扩散速度可能小于沉积层厚度增大的速度,结果,淤泥深部的重碳酸盐来不及到达沉积物的近表面部分;因此,不能形成成岩作用的“堆积层”。

黑色粘土层的特点是几乎完全不含砂质粉砂杂质,这也促进了韵律的形成。相反,如果在粘土中出现了较粗物质的夹层,那么韵律形成过程就会遭到破坏,因为 CO_2 会沿着这些小夹层从淤泥中排出,从而改变了碳酸的状态。因此,是另一个决定韵律形成过程顺利进行的条件。

既然在含结核夹层形成时,能有碳酸盐物质从整个沉积物中迁移出来,那么这种作用对粘土中碳酸盐含量的变化也应产生影响。而且,这种作用越强烈,岩石中能保存的原生碳酸盐的数量应当越少。实际上,在 $\text{C}_{\text{有机}}$ 含量与岩石的碳酸盐含量之间可以看到反比关系:含大量 $\text{C}_{\text{有机}}$ (达10%)的粘土,几乎是不含碳酸盐的。这种规律性从图1中可以清楚地看到。因为沉积物中的碳酸盐物质发生了明显的再分配,所以根据岩石中剩余的碳酸盐含量很难判断其原始值。然而,苏联学者指出,他们从未见到过碳酸盐含量超过15—20%的粘土中,有韵律结构的岩段。

影响成岩作用形成韵律层的因素很多,也就是说这种作用过程是某些自变量的函数。这些自变量的变化相应地决定了剖面各部分韵律之间的重大区别。

恰克腊克-卡腊冈地层中含结核岩段结构的许多细节与描述的韵律形成机制十分吻合。特别是结核的大小与含结核夹层间距离(当夹层中结核之间的距离没有明显加大时)之间存在明显的正比关系。实际上,有碳酸盐迁出的沉积物的体积越大(也就是夹层之间的距离加大时),夹层中堆积物质的数量越大。相应地结核的个体也增大(见图2和3)。而且,在黑色粘土岩段的最底层从未见到方解石结核,这是因为该部分提供了一定体积的形成结核层所需的物质。

在恰克腊克-卡腊冈地层中,含结核岩段的韵律结构是成岩作用早期形成的方解石结核所特有的。这是由于在沉积物活跃带的成岩作用早期阶段韵律形成作用进行得最为顺利。按 Н. М. 斯特拉霍夫(1976)的估算,这种沉积物活跃带延伸约1.5 m,在这里可以看到碱储备量的最大梯度。因为方解石结核夹层之间的距离通常为10—30 cm,而黑色粘土在成岩作用期间压实了3—4倍(Гаврилов 1977),所以在未压实的淤泥中,上述距离为0.5—1.5 m。淤泥的疏松性和高度充水性,也是重碳酸盐向沉积物近表面层顺利扩散的必要条件。

许多证据表明,方解石结核正是在沉积物的最上部层位中形成的。后来,在某些岩段局部压实的沉积物中,在上述结核上有菱铁矿生长,并形成带状结核。在这些岩段中,菱铁矿并不形成独立的结核,而仅仅是在早期成岩阶段形成的方解石核周围富集。然而,在成岩作用的早期,碳酸盐和粘土物质的分异程度并不一定很充分,以至能在已形成的岩石中留下这种分异作用所造成的后果,即造成串珠状的结核或小夹层,成岩作用形成的层可能只是造成碳酸盐物质略微富集的夹层。但是,已经产生的沉积物的非均质性,足以控制成岩作用较晚期淤泥中自生组分的重新分配。因此,如果以后在沉积物中进一步形成碳酸盐(如 FeCO_3),那么,这种碳酸盐与带状结核形成时的情形一样,也是向着富含 CaCO_3 的夹层集结,并在其周围沉积下来。

同样应该考虑到,碳酸盐物质富集的夹层可能起着特殊的地球化学过滤器的作用。由于这些夹层范围的 pH 值偏高,因此溶于压实时被挤出(被榨出的)水中的碳酸盐在这里沉积并提高了夹层中碳酸盐的含量,从而促使沉积物分为两个相。

因此,成岩作用早期阶段产生的沉积物的岩性非均一性,后来继续得到加强。

人们多次指出,恰克腊克-卡腊冈地层中串珠状的结核沿走向过渡为厚度不大(2—4 cm)的连续层,往往可追索数百米以上。这些岩层的成岩作用性质是毫无疑问的。显然,碳酸盐是集结为结核还是沉积为层,其决定性条件是被迁移的碳酸盐物质的量,如果大量富集则形成连续的层。人们可能把碳酸盐在剖面中的大量富集当作原始沉积的层。看来,查明成岩夹层的标准可能是这些夹层沿走向的相对不稳定性(数百米,偶而达到 2000—3000m),夹层中含有大量明显的成岩矿物(菱铁矿),夹层中没有明显的沉积性质的标志(生物生存的痕迹、浊流构造、水下滑坡等)。

Виналь(1959)认为,根据成岩作用形成层的假说,可以解释含结核夹层结构的某些特征。例如,含结核夹层顺走向分成两支。显然,不能把这种现象与任何沉积原因联系起来。但是,成岩作用形成层的机制完全有可能使一个层发生分叉。当沉积物的性质在侧向上发生的变化(如碳酸盐物质、有机质、粉砂质杂质含量的变化)乍一看来极其微小时,就可能产生上述现象。所有这些原因(可能还有某些其它原因)都对成岩改造作用过程有影响,可能会使成层作用过程比邻近地段加快或减慢。结果,随着沉积物的堆积,在同时代的层位中,有的地方可能形成两个碳酸盐夹层,有的地方则只形成一个夹层,因此在已形成的岩石剖面中表现为结核层顺走向的分支现象。

陆源沉积物中成岩作用引起的韵律,看来并不是罕见的现象。达格斯坦下中侏罗统地层中的菱铁矿堆积可以作为韵律形成的例子。在这里,可以看到很厚(数十米)的粘土沉积岩段,其中有许多含菱铁矿结核的夹层或边续的菱铁矿夹层(厚 2—3 cm),各夹层的间距约 5—15 cm。夹层沿走向延续数百米而无明显变化。由于它们基本上是由典型的成岩矿物——菱铁矿组成的,所以没有任何根据推测它们是沉积成因的。相反,如果假设它们是在成岩作用期间形成的,那么这一地层的全部结构细节均可得到解释。

A. 哈勒姆(Hallam, 1964)研究过英国里阿斯统的沉积岩,提供了一批有意义的证明材料,这些材料证实成岩作用形成碳酸盐夹层的看法。他指出,剖面越厚,它的包含的钙质层的数量越多。而且,在一些不太厚的剖面中,钙质层部分地消失并不说明它们没有沉积,因为有可靠的古生物资料证明,供对比的这些剖面是同时代的。在这种情况下,所见到的规则的旋回顺序完全是由地层中物质的次生再分配决定的。根据 П. 达夫等人(1971)的意见,“韵律划分”的假说消除了由于必须用沉积环境特征来解释剖面中许多细小但重要的岩性变化的引起的困难。

从成岩作用形成碳酸盐韵律的机制实质中可能看出,形成层的决定性条件是淤泥水中 HCO_3^- 的浓度沿垂向的变化。但是,在现代沉积物中并不是所有水化学类型的淤泥水都以这种情况为特征。例如,在氯化钠钙的水中, HCO_3^- 均匀分布,因此,不存在形成碳酸盐夹层的条件。此外,即使淤泥水中发现了 HCO_3^- 的含量随着深度增加而有规律地增大的现象,也未必总是会出现成岩作用形成层的过程,这只是在浓度达到一定程度的差别时才有可能发生。碱储备量的梯度是变动的,取决于各种因素的值。现代沉积物的实例的表明,甚至在同一个水体中,淤泥水中 HCO_3^- 的性状变化也很明显(鄂霍次克海, О. В. Шишкина, 1972)。苏联学者还认为,在某些情况下,可以看到 HCO_3^- 的浓度随着深度加大而明显增高的现象;在另一些情况下,这种现象表

现比较微弱。因此,在古老沉积物的剖面中,组成岩层的岩石性质的微小变化也会引起成岩碳酸盐(结核)夹层的出现或消失。

显然,在某些现代水体的沉积物中也应当有成岩作用形成韵律的过程发生。

苏联学者认为,随着对沉积物的进一步研究,上述机制存在的现实性将会得到证实。然而,为了获得肯定的结果,要求(1)对合适的对象进行研究(还原沉积物,沉积作用稳定,即比较单一的地层,不可能以沉积方式堆积碳酸盐夹层),(2)综合研究沉积物和淤泥水,(3)进行详细取样,据此可以掌握整个柱状图长度内碳酸盐含量的变化,而不是碳酸盐含量在这柱状图个别区段内的变化情形。

林彻、奚瑾秋

(地矿部情报研究所)

《根据 „Литология и полезные ископаемые 4, 1979” 等资料编译